فصل ۱۶

انتروپی و قانون دوم ترمودینامیک

بخش ۱۶-۱ تغییر انتروپی

●۱۰- SSM فرض کنید $۴/۰۰\text{mol}$ از یک گاز آرمانی با انبساط تک‌دما از حجم $V_۱$ به حجم $V_۲=۲/۰۰V_۱$ در دمای $T=۴۰۰\text{K}$ می‌رود. (الف) کار انجام شده به وسیلهٔ گاز و (ب) تغییر انتروپی گاز را پیدا کنید. (پ) اگر انبساط برگشت‌پذیر و به جای تک‌دما بی‌دررو باشد، تغییر انتروپی گاز چقدر است؟

حل: (الف) فرآیند تک‌دماست، پس

$$W=\int pdV=\int_{V_۱}^{۲V_۱}\frac{nRTdV}{V}=nRT\ln ۲$$

$$W=۴(۸/۳۱)(۴۰۰)\ln ۲=۹/۲۲\times ۱۰^{۳}\ \text{J}$$

(ب) از آنجا که فرآیند تک‌دماست. لذا

$$\Delta E_{\text{int}}=۰\Rightarrow Q=W$$

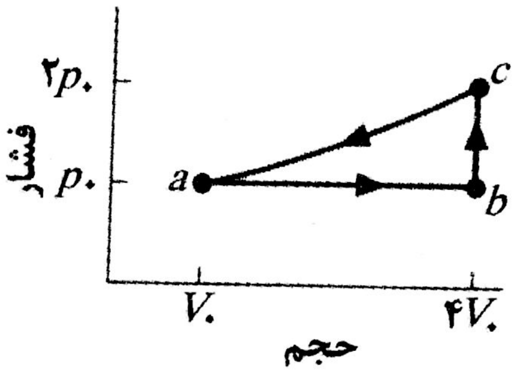
$$\Delta S=\frac{Q}{T}=\frac{W}{T}=\frac{۹/۲۲\times ۱۰^{۳}}{۴۰۰}=۲۳/۱\text{J/K}$$

(پ) انتروپی برای فرآیند بی‌دررو برگشت‌پذیر صفر است.

$$\Delta S=\oint\frac{dQ}{T}=۰$$

Scanned by CamScanner

۱۴●●●- (الف) $1/\circ\,mol$ گاز آرمانی تک اتمی چرخهٔ شکل ۱۶-۲۴ را طی می‌کند، وقتی که گاز از حالت a به حالت c در راستای مسیر abc برود $W/p_\circ V_\circ$ چقدر است؟ $\Delta E_{int}/p_\circ V_\circ$ در طول (ب) از b به c و (پ) در یک چرخهٔ کامل چقدر است؟ ΔS در طول (ت) از b به c و (ث) در یک چرخهٔ کامل چقدر است؟



شکل ۱۶-۲۴ مسئلهٔ ۱۴

حل: (الف) فرآیند ab تک فشار و فرآیند bc تک حجم است.

$$W_{bc} = \circ$$

$$W = W_{ab} + W_{bc} = p\Delta V = p_\circ(۴V_\circ - V_\circ) = ۳p_\circ V_\circ$$

$$\frac{W}{p_\circ V_\circ} = ۳$$

(ب)

$$\Delta E_{int} = Q - W = \frac{۳}{۲}nR\Delta T = \frac{۳}{۲}V\Delta P$$

$$\Rightarrow \Delta E_{int} = \frac{۳}{۲}(۴V_\circ)(p_\circ) = ۶p_\circ V_\circ$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta E_{int}}{p_\circ V_\circ} = ۶$$

Scanned by CamScanner

(پ) تغییر انرژی درونی چرخهٔ کامل صفر است،

$$\Delta E_{\text{int}} = ۰$$

(ت) در فرآیند bc داریم؛

$$\frac{T_f}{T_i} = \frac{p_f}{p_i} \quad \text{(در فرآیند تک حجم)}$$

$$\Delta S = nC_V \ln \frac{T_f}{T_i} = ۱\left(\frac{۳}{۲}\right)(۸/۳۱)\ln\left(\frac{۲p_۰}{p_۰}\right) = ۸/۶۴\,\text{J/K}$$

(ث) در کل چرخه $\Delta S = ۰$ است.

Scanned by CamScanner

●●●۱۵- آمیزه‌ای از 1773g آب و 227g یخ در حالت تعادل اولیه با دمای $0/000^{\circ}C$ قرار دارند. سپس، این آمیزه در یک فرآیند برگشت‌پذیر به حالت تعادل بعدی که در آن در دمای $0/000^{\circ}C$ نسبت جرمی آب به یخ برابر با $1/00:1/00$ است برده می‌شود. (الف) تغییر انتروپی سامانه را در طی این فرآیند محاسبه کنید (گرمای ذوب آب 333 kJ/kg است). (ب) سپس، این سامانه با یک فرآیند برگشت‌ناپذیر (مثلاً با استفاده از شعلهٔ چراغ) به حالت تعادل اولیه برگردانده می‌شود. تغییر انتروپی سامانه را در طی این فرآیند محاسبه کنید. (پ) آیا پاسخ‌های شما با قانون دوم ترمودینامیک سازگاری دارند؟

حل: مجموع جرم آب و یخ برابر است با:

$$m_0 = 1773 + 227 = 2000\,g$$

جرم آب و یا یخ نیز به‌صورت زیر است:

$$m_1 = m_2 = \frac{m_0}{2} = 1000\,g$$

جرم آبی که به یخ تبدیل شده است برابر است با:

$$m = 1773 - 1000 = 773\,g$$

(الف) تغییر انتروپی آب صفر به یخ صفر برابر است با؛

$$\Delta S = -\frac{Q}{T} = -\frac{mL_F}{T} = \frac{-(0/773)(333000)}{273} = -943\ J/K$$

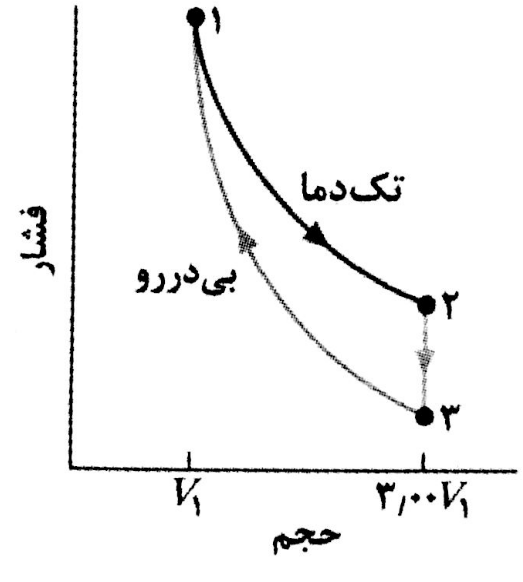
(ب) تغییر انتروپی تبدیل یخ صفر به آب صفر برابر است با:

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{T} = \frac{mL_F}{T} = \frac{(0/773)(333000)}{273} = 943\ J/K$$

(پ) بله زیرا با در نظر گرفتن تغییر انتروپی محیط، مجموع تغییر انتروپی‌ها مثبت است. (تغییر انتروپی که شعله چراغ ایجاد می‌کند با مجموع این دو تغییر انتروپی که برابر صفرند در نظر گرفته می‌شود).

Scanned by CamScanner

●●۱۷- برای n مول از یک گاز آرمانی دو اتمی که چرخهٔ شکل ۱۶-۲۵ را با چرخش مولکول‌ها و بدون نوسان می‌پیماید، و در آن $V_{23} = ۳/۰۰ V_1$ (الف) p_2/p_1، (ب) p_3/p_1 و (پ) T_3/T_1 چقدر است؟ در مسیر ۱ ← ۲، (ت) W/nRT_1 ، (ث) Q/nRT_1 ، (ج) $\Delta E_{int}/nRT_1$ و (چ) $\Delta S/nR$ چقدر است؟ در مسیر ۲ ← ۳، (ح) W/nRT_1، (خ) Q/nRT_1، (د) $\Delta E_{int}/nRT_1$ (ذ) $\Delta S/nR$ چقدر است؟ در مسیر ۳ ← ۱ (ر) W/nRT_1 ، (ز) Q/nRT_1، (ژ) $\Delta E_{int}/nRT_1$، (س) $\Delta S/nR$ چقدر است؟



شکل ۱۶-۲۵ مسئلهٔ ۱۷

Scanned by CamScanner

حل: **(الف)** فرآیند ۲→ ۱ تک‌دماست.

$$\frac{p_۲}{p_۱}=\frac{V_۱}{V_۲}=\frac{۱}{۳}=۰/۳۳۳$$

(ب) فرآیند ۱→ ۳ بی‌دررو است،

$$\frac{p_۳}{p_۱}=\left(\frac{V_۱}{V_۳}\right)^{\gamma}\Rightarrow\frac{p_۳}{p_۱}=\left(\frac{۱}{۳}\right)^{۱/۴}=۰/۲۱۵$$

(پ)

$$\frac{T_۳}{T_۱}=\left(\frac{V_۱}{V_۳}\right)^{\gamma-۱}\Rightarrow\frac{T_۳}{T_۱}=\left(\frac{۱}{۳}\right)^{۰/۴}=۰/۶۴۴$$

(ت)

$$W=nRT_۱\ln\frac{V_۲}{V_۱}\Rightarrow\frac{W}{nRT_۱}=\ln\frac{۳V_۱}{V_۱}=\ln ۳\simeq ۱/۱$$

(ث)

$$\Delta E_{int_۱}\ (\text{تک‌دما})=۰\Rightarrow Q=W$$

$$\frac{Q}{nRT_۱}=\frac{W}{nRT_۱}=۱/۱$$

(ج)

$$\frac{\Delta E_{int_۱}}{nRT_۱}=\frac{۰}{nRT_۱}=۰$$

(چ)

$$\Delta S_۱=\frac{Q}{T_۱}\Rightarrow\Delta S_۱=\frac{۱/۱nRT_۱}{T_۱}=۱/۱nR$$

$$\Rightarrow\frac{\Delta S_۱}{nR}=۱/۱$$

(ح) فرآیند ۳→۲ تک حجم است و کار در این فرآیند صفر است.

$$W_۲=۰\Rightarrow\frac{W_۲}{nR_۱}=۰$$

(خ)

$$CV=\frac{۵}{۲}R\ \ (\text{گاز دو اتمی})$$

$$Q_۲=nC_V\,\Delta T=\frac{۵}{۲}nR(T_۳-T_۲)=۲/۵nR(۰/۶۴۴T_۱-T_۱)$$

$$\Rightarrow\frac{Q_۲}{nRT_۱}=(۲/۵)(-۰/۳۵۶)\approx-۰/۸۸۹$$

(د)

$$\Delta E_{int_۲}=Q_۲-W_۲=Q_۲$$

$$\Rightarrow\frac{\Delta E_{int_۲}}{nRT_۱}=-۰/۸۸۹$$

(ذ)

$$\Delta S_۲=nC_V\ln\frac{T_۳}{T_۲}=\frac{۵}{۲}nR\ln\frac{۰/۶۴۴T_۱}{T_۱}$$

$$\Rightarrow\frac{\Delta S_۲}{nR}=۲/۵\ln ۰/۶۴۴\approx-۱/۱۰$$

(ر) فرآیند ۱→ ۳ بی‌دررو است، لذا

$$Q_۳=۰\ ,\ W_۳=-\Delta E_{int_۳}=-nC_V\Delta T$$

$$W_۳=-\frac{۵}{۲}nR(T_۱-T_۳)=-\frac{۵}{۲}nR(T_۱-۰/۶۴۴T_۱)$$

$$=-۰/۸۸۹nRT_۱$$

$$\frac{W_۳}{nRT_۱}=-۰/۸۸۹$$

(ز)

$$\frac{Q_۳}{nRT_۱}=۰$$

Scanned by CamScanner

(ژ) $\Delta E_{int_۳} = -W_۳ \Rightarrow \frac{\Delta E_{int_۳}}{nRT_۱} = ۰/۸۸۹$

(س) از آنجا که فرآیند بی‌دررو است و $Q_۳ = ۰$ ، $\Delta S_۳ = ۰$ می‌باشد.

$$\frac{\Delta S_۳}{nR} = ۰$$

Scanned by CamScanner

●●●●۱۹- فرض کنید 1/00 mol گاز آرمانی تک اتمی از فشار اولیهٔ p_1 و حجم اولیهٔ V_1 دو مرحله را طی کند: (۱) یک انبساط تک‌دما به حجم $2/00V_1$ و (۲) افزایش فشار به مقدار $2/00p_1$ در حجم ثابت. Q/p_1V_1 برای (الف) مرحلهٔ ۱ و (ب) مرحلهٔ ۲ چقدر است؟ W/p_1V_1 برای (پ) مرحلهٔ ۱ و (ت) مرحلهٔ ۲ چقدر است؟ برای کل فرآیند، (ث) $\Delta E_{int}/p_1V_1$ و (ج) ΔS، چقدر است؟ گاز به حالت اولیه خود برمی‌گردد و دوباره به همان حالت نهایی ولی با دو مرحلهٔ زیر بازگردانده می‌شود: (۱) یک تراکم تک‌دما به فشار $2/00p_1$ و (۲) یک افزایش حجم به $2/00V_1$ در فشار ثابت. Q/p_1V_1 برای (چ) مرحلهٔ ۱ و (ح) مرحلهٔ ۲، چقدر است؟ W/p_1V_1 برای (خ)

Scanned by CamScanner

مرحلهٔ ۱ و (د) مرحلهٔ ۲ چقدر است؟ در کل فرآیند (د) $\Delta E_{int}/p_1V_1$ و (ذ) ΔS چقدر است؟

حل: (الف) فرآیند اول تک‌دماست.

$$Q = W = \int p\,dV = \int_{V_1}^{۲V_1} nRT_1\frac{dV}{V} = nRT_1\ln ۲$$

$$\frac{Q}{p_1V_1} = \frac{nRT_1\ln ۲}{nRT_1} = \ln ۲ = ۰/۶۹۳$$

(ب) فرآیند دوم تک حجم است $(p_1V_1 = p_2V_2)$.

$$\frac{Q}{p_1V_1} = \frac{nC_V(T_3-T_1)}{p_1V_1}$$

$$= \frac{\frac{۳}{۲}nR\left(\frac{p_3V_3}{nR}-\frac{p_2V_2}{nR}\right)}{p_1V_1} = \left(\frac{۳}{۲}\right)\cdot\frac{(۲p_1\cdot ۲V_1 - p_1V_1)}{p_1V_1}$$

$$= ۴/۵۰$$

(پ)

$$\frac{W}{p_1V_1} = \frac{nRT_1\ln ۲}{p_1V_1} = \frac{nRT_1\ln ۲}{nRT_1} = ۰/۶۹۳$$

(ت) کار در فرآیند تک حجم صفر است.

$$\frac{W}{p_1V_1} = \frac{۰}{p_1V_1} = ۰$$

(ث)

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_3V_3}{T_3} \Rightarrow T_3 = ۴T_1$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک؛

$$\frac{\Delta E_{int}}{p_1V_1} = \frac{nC_V(T_3-T_1)}{p_1V_1} = \frac{\frac{۳}{۲}nR(۳T_1)}{nRT_1} = ۴/۵$$

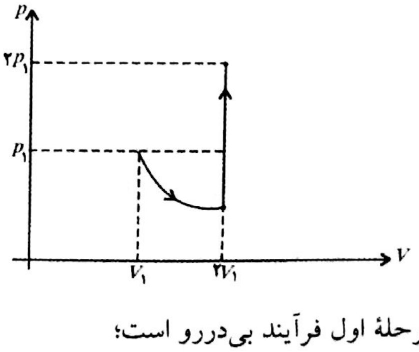
(ج)

$$\Delta S = \Delta S_{12} + \Delta S_{23} = \frac{Q}{T_1} + \int\frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S = R\ln ۲ + \frac{۳}{۲}R\ln ۴\frac{T_1}{T_1} = ۴R\ln ۲ = ۴(۸/۳۱)\ln ۲$$

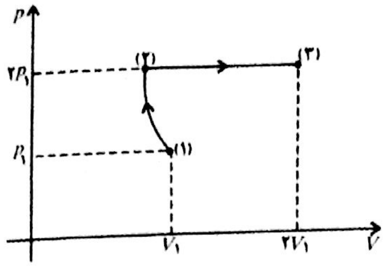
$$= ۲۳/۰\,\text{J/K}$$

اگر سامانه به نقطهٔ اولیه باز گردد، در مرحلهٔ اول تراکم هم‌دما داریم.



(چ) در مرحلهٔ اول فرآیند بی‌دررو است؛

$$\Delta E_{int} = ۰ \Rightarrow Q = W = nRT_1\ln\frac{V_2}{V_1}$$



از قانون گازهای کامل در فرآیند تک‌دما داریم؛

$$p_1V_1 = p_2V_2 \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{۱}{۲} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{۲}$$

$$Q = nRT_1\ln\frac{V_2}{V_1} = p_1V_1\ln\frac{V_{1/2}}{V_1} = -p_1V_1\ln ۲$$

$$\frac{Q}{p_1V_1} = -\ln ۲ = -۰/۶۹۳$$

(ح) مرحله دوم، تک فشار است،

$$Q_2 = nC_p\Delta T = \frac{۵}{۲}nR\Delta T$$

با استفاده از قانون گازهای کامل داریم؛

$$p_2\Delta V = nR\Delta T$$

$$\Rightarrow Q_2 = \frac{۵}{۲}p_2\Delta V = \left(\frac{۵}{۲}\right)(۲p_1)\left(۲V_1 - \frac{V_1}{۲}\right) = ۵p_1\cdot\frac{۳V_1}{۲}$$

$$= ۷/۵p_1V_1$$

$$\frac{Q_2}{pV_1} = ۷/۵۰$$

(خ) مرحلهٔ اول، تک‌دماست، $\Delta E_{int} = ۰$

$$Q_1 = W_1 = -p_1V_1\ln ۲$$

$$\frac{W_1}{p_1V_1} = -\ln ۲ = -۰/۶۹۳$$

(د) مرحلهٔ دوم، تک فشار است،

$$W_2 = p_2\Delta V = (۲p_1)\left(۲V_1 - \frac{V_1}{۲}\right) = ۲p_1\cdot\frac{۳V_1}{۲} = ۳p_1V_1$$

$$\frac{W_2}{p_1V_1} = ۳$$

(ذ) در فرآیند اول که تک‌دماست، $\Delta E_{int_1} = ۰$ است، لذا

$$\frac{\Delta E_{int_1}}{p_1V_1} = ۰$$

در فرآیند دوم که تک فشار است،

$$\Delta E_2 = Q_2 - W_2 = (۷/۵p_1V_1) - (۳p_1V_1) = ۴/۵p_1V_1$$

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} + nC_p\ln\frac{T_3}{T_2}$$

(ر)

$$\Delta S = \frac{-۰/۶۹۳p_1V_1}{T_1} + nC_p\ln\left[\frac{p_3V_3}{p_2V_2}\right]$$

$$= (۰/۶۹۳)R + ۱\left(\frac{۵}{۲}R\right)\ln ۴ = ۲۳/۰\,\text{J/K}$$

Scanned by CamScanner

۲۰- ۱/۰۰mol گاز تک اتمی که در آغاز در ۵/۰۰kPa و ۶۰۰K قرار دارد از حجم اولیهٔ $V_i = ۱/۰۰\,m^۳$ به حجم نهایی $V_f = ۲/۰۰\,m^۳$ منبسط می‌شود. در هر لحظه از انبساط، فشار p و حجم V گاز با رابطهٔ $p = ۵/۰۰\exp[(V_i - V)/a]$ به هم مربوط‌اند، که p برحسب کیلوپاسکال، V_i و V برحسب مترمکعب و $a = ۱/۰۰\,m^۳$ است. (الف) فشار و (ب) دمای نهایی گاز چقدر است؟ (پ) در طی انبساط چقدر کار انجام می‌گیرد؟ (ت) ΔS برای انبساط چقدر است؟ (*راهنمایی*: برای پیداکردن ΔS دو فرایند سادهٔ برگشت‌پذیر را در نظر بگیرید.)

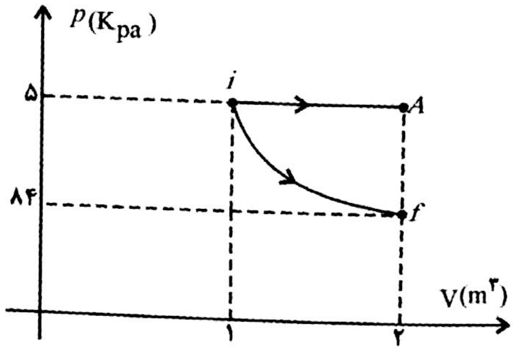
حل: (الف) $p = ۵\exp(۱-V) = ۵\exp(۱-۲) = ۱/۸۴\,kPa$

(ب) $\dfrac{p_۱V_۱}{T_۱} = \dfrac{p_۲V_۲}{T_۲} \Rightarrow \dfrac{(۵)(۱)}{۶۰۰} = \dfrac{(۱/۸۴)(۲)}{T_۲} \Rightarrow T_۲ = ۴۴۱K$

(پ) $W = \int_{V_۱}^{V_۲} p\,dV = \int_۱^۲ (۵۰۰۰)\exp(۱-V)\,dV$

$$= -۵۰۰۰\exp(۱-V)\Big]_۱^۲ = -۵۰۰۰(e^{-۱}-۱) = ۳/۱۶\times۱۰^۳\,J$$

(ت) مسیر if را می‌توان شامل دو فرآیند تک فشار و تک حجم در نظر گرفت.



فرآیند iA تک فشار است

$$\Delta S_{iA} = nC_p \ln\frac{T_A}{T_i} = nC_p \ln\frac{V_A}{V_i} = (۱)\left(\frac{۵}{۲}\right)(۸/۳۱)\ln\left(\frac{۲}{۱}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta S_{iA} = ۱۴/۴\,J/K$$

فرآیند Af تک حجم است

$$\Delta S_{AF} = nC_V \ln\frac{T_f}{T_A} = nC_V \ln\frac{p_f}{p_A}$$

$$AS_{AF} = (۱)\left(\frac{۳}{۲}\right)(۸/۳۱)\ln\left(\frac{۱/۸۴}{۵}\right) = -۱۲/۴۶\,J/K$$

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_{iA} + \Delta S_{Af} = ۱۴/۴ - ۱۲/۴۶ = ۱/۹۴\,J/K$$

Scanned by CamScanner

●●●۲۲- ۱۳۰g آب ۸۰/۰°C داخل یک فلاسک عایق‌بندی شده قرار دارد. با افزودن ۱۲/۰g یخ ۰°C به آن، سامانه یخ + آب اولیه تشکیل می‌شود. (الف) دمای تعادل سامانه چقدر است؟ تغییر انتروپی آبی که در آغاز یخ بوده است (ب) وقتی یخ ذوب می‌شود و (پ) وقتی برای رسیدن به دمای تعادل گرم می‌شود، چقدر است؟ (ت) تغییر انتروپی آب اولیه وقتی با سردشدن به دمای تعادل می‌رسد؟ (ث) تغییر انتروپی خالص سامانه یخ + آب اولیه وقتی که به دمای تعادل می‌رسد، چقدر است؟

حل: (الف)

$$m_۱ c_W \Delta T + m_۲ L_F + m_۲ c_W T_f = ۰$$

$$(۰/۱۳)(۴۱۹۰)(T_f - ۸۰) + (۰/۰۱۲)(۳۳۳۰۰۰) + (۰/۰۱۲)(۴۱۹۰)T_f = ۰$$

$$۵۴۴/۷T_f - ۴۳۵۷۶ + ۳۹۹۶ + ۴۹/۱T_f = ۰ \Rightarrow T_f = ۶۶/۵°\text{C}$$

(ب)

$$\Delta S_۲ = \frac{Q}{T} = \frac{m_۲ L_F}{T} = \frac{(۰/۰۱۲)(۳۳۳۰۰۰)}{۲۷۳} = ۱۴/۶\,\text{J/K}$$

(پ)

$$\Delta S'_۲ = \int \frac{dQ}{T} = m_۲ c_W \int_{۲۷۳}^{۳۳۹/۷} \frac{dT}{T} = (۰/۰۱۲)(۴۱۹۰)\ln\left(\frac{۳۳۹/۷}{۲۷۳}\right) = ۱۱/۰\,\text{J/K}$$

(ت)

$$\Delta S_۱ = \int \frac{dQ}{T} = m_۱ c_W \int_{۳۵۳}^{۳۳۹/۷} \frac{dT}{T} = (۰/۱۳)(۴۱۹۰)\ln\left(\frac{۳۳۹/۷}{۳۵۳}\right) = -۲۱/۲\,\text{J/K}$$

Scanned by CamScanner

●۲۳- بازده یک ماشین کارنو که منبع دمای پایین آن در $۱۷^{\circ}C$ قرار دارد ۴۰٪ است. دمای منبع چقدر باید افزایش یابد تا بازده به ۵۰٪ برسد؟

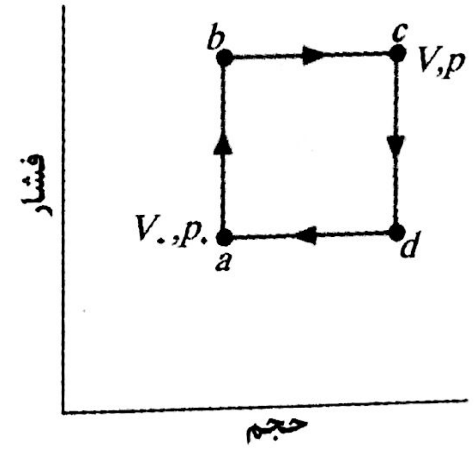
حل: $\varepsilon = ۱ - \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow T_H = \frac{T_L}{۱-\varepsilon} = \frac{۱۷+۲۷۳}{۱-۰/۴} = ۴۸۳\text{K}$

اگر $\varepsilon = ۰/۵$ را در رابطهٔ بازده قرار دهیم، $T'_H = ۵۸۰\text{K}$ است؛

$$T'_H - T_H = ۵۸۰ - ۴۸۳ = ۹۷\text{K}$$

Scanned by CamScanner

●●۲۹- شکل ۱۶-۲۷ چرخهٔ برگشت‌پذیری را نشان می‌دهد که $1/00\,mol$ گاز تک اتمی آن را طی می‌کند. فرض کنید $p=2p_0$، $V=2V_0$، $p_0=1/01\times10^5\,Pa$ و $V_0=0/0225\,m^3$. مطلوب است (الف)کار انجام شده در طی چرخه، (ب) انرژی گرمایی داده شده در طول مرحلهٔ *abc* و (پ) بازده چرخه . (ت) بازده یک ماشین کارنو که میان بالاترین و پایین‌ترین دماهای موجود در این چرخه کار می‌کند چقدر است؟ (ث) آیا این از بازده محاسبه شده دربند (پ) بیشتر است یا کمتر؟



شکل ۱۶-۲۷ مسئلهٔ ۲۹

Scanned by CamScanner

حل:
$$T_a = \frac{p_a V_a}{nR} = \frac{p_\circ V_\circ}{nR} = \frac{(۱\times ۱۰^۵)(۰/۰۲۲۵)}{(۱)(۸/۳۱)} = ۲۷۰/۶\text{K}$$

$$T_b = \frac{(۲p_\circ V_\circ)}{nR} = ۲T_a = ۲(۲۷۰/۶) = ۵۴۱/۲\text{K}$$

$$T_c = \frac{(۲p_\circ)(۲V_\circ)}{nR} = ۴T_a = ۴(۲۷۰/۶) = ۱۰۸۲/۴\text{K}$$

(الف) کار برابر با مساحت زیر نمودار $p-V$ است.

$$W = (۲p_\circ - p_\circ)(۲V_\circ - V_\circ) = p_\circ V_\circ = (۱/۰۳\times ۱۰^۵)(۰/۰۲۲۵)$$
$$= ۲۲۷۲\,\text{J}$$

(ب)
$$Q_{ab} = nC_V \Delta T = \frac{۳}{۲} nR(T_b - T_a)$$
$$= \frac{۳}{۲}(۱)(۸/۳۱)(۵۴۱/۲ - ۲۷۰/۶) = ۳۳۷۵\,\text{J}$$

$$Q_{bc} = nC_p \Delta T = \frac{۵}{۲} nR(T_b - T_a)$$
$$= \frac{۵}{۲}(۱)(۸/۳۱)(۱۰۸۲/۴ - ۵۴۱/۲) = ۱۱۲۴۸/۸\,\text{J}$$

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = (۳۳۷۵ + ۱۱۲۵۰) = ۱۴۶۲۵\,\text{J}$$

(پ) در فرآیند abc ، انـرژی گرمـایی مثبـت و Q_H اسـت و در فرآیند cda ، انرژی گرمایی منفی و Q_C است.

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_H} = \frac{۲۲۷۲}{۱۴۶۲۵} = ۰/۱۵۵ \text{ یا } ٪۱۵/۵$$

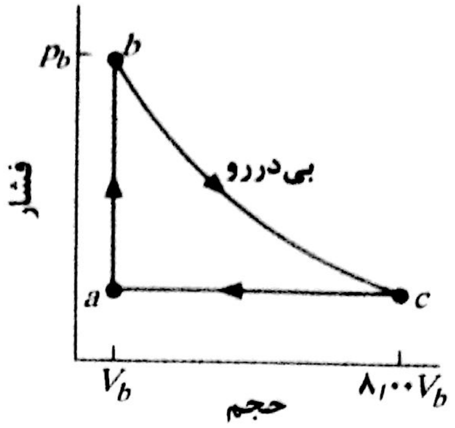
(ت)
$$\varepsilon_{\text{کارنو}} = ۱ - \frac{T_C}{T_H} = ۱ - \frac{۲۷۰/۶}{۱۰۸۲/۴} = ۰/۷۵ \text{ یا } ٪۷۵$$

(ث) بازده کارنو بیشتر است.

Scanned by CamScanner

●●۳۳- SSM ILW شکل ۱۶-۲۹ چرخهٔ برگشت‌پذیری را نشان می‌دهد که ۱/۰۰mol از یک گاز آرمانی تک اتمی طی می‌کند. فرآیند bc یک انبساط بی‌دررو با $p_b = ۱۰/۰ \text{atm}$ و $V_b = ۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}\ \text{m}^۳$ است. مطلوب است (الف) انرژی گرمایی داده شده به گاز، (ب) انرژی گرمایی خارج شده از گاز، (پ) کار خالص انجام شده به وسیلهٔ گاز و (ت) بازده چرخه،

Scanned by CamScanner



شکل ۱۶–۲۹ مسئلهٔ ۳۳

حل:

$$T_b = \frac{p_b V_b}{nR} = \frac{(1/013\times10^{5})(1\times10^{-3})}{(1)(8/31)} = 121/5\text{K}$$

$$T_c = T_b\left(\frac{V_b}{V_c}\right)^{\gamma-1} \Rightarrow T_c = (121/5)\left(\frac{1}{8}\right)^{0/67} = 30/46\text{K}$$

$$T_a = T_c\left(\frac{V_a}{V_c}\right) = (30/46)\left(\frac{1}{8}\right) = 3/8\text{K}$$

(الف) $$Q_{ab} = nC_V(T_b - T_a) = (1)\left(\frac{3}{2}\right)(8/31)(121/5 - 3/8)$$

$$= 1/47\times10^{3}\ \text{J}$$

(ب) Q_{bc} (بی‌دررو) $= 0$

$$Q_{ca} = nC_p(T_a - T_c) = (1)\left(\frac{5}{2}\right)(8/31)(3/8 - 30/46)$$

$$= -5/54\times10^{2}\ \text{J}$$

انرژی گرمایی از گاز دریافت شده است.

(پ) انرژی درونی چرخه صفر است.

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$$

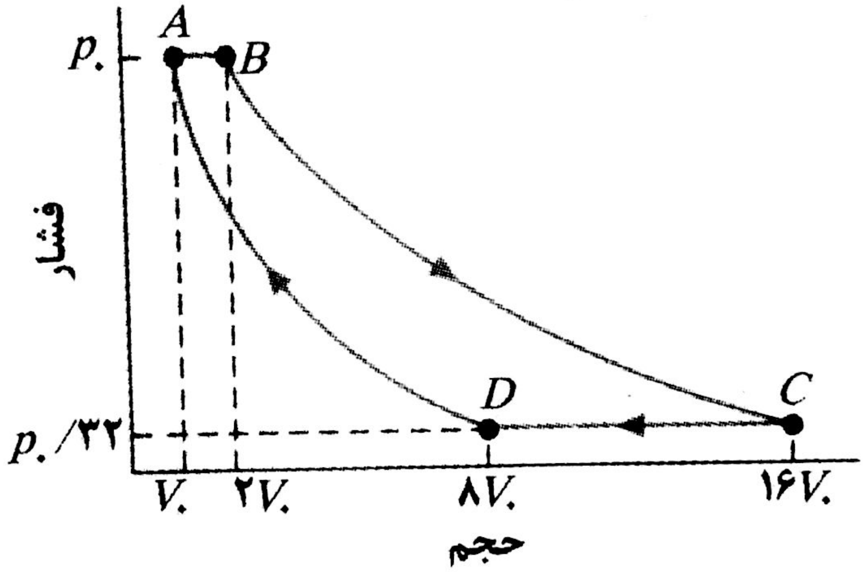
$$\Rightarrow Q = W$$

$$W = Q_{ab} + Q_{ca} = 1/47\times10^{3} - 5/54\times10^{2} = 9/18\times10^{2}\ \text{J}$$

(ت) $$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_H|} \Rightarrow e = 1 - \left(\frac{554/1}{1470}\right) = 0/624$$ یا ٪۶۲/۴

Scanned by CamScanner

۳۴●●- یک گاز آرمانی $(1/0\,\text{mol})$ مادهٔ کاری در ماشینی است که در چرخه نشان داده شده در شکل ۱۶-۳۰ کار می‌کند. فرآیندهای BC و DA برگشت‌پذیر و بی‌دررو هستند. (الف) آیا گاز تک اتمی، دو اتمی یا چند اتمی است؟ بازده ماشین چقدر است؟



شکل ۱۶-۳۰ مسئلهٔ ۳۴

Scanned by CamScanner

حل: (الف) فرآیند DA بی‌دررو است؛

$$\frac{p_D}{p_A}=\left(\frac{V_A}{V_D}\right)^{\gamma}\Rightarrow\frac{\frac{p_\circ}{۳۲}}{p_\circ}=\left(\frac{V_\circ}{۸V_\circ}\right)^{\gamma}\Rightarrow\frac{۱}{۲^{۵}}=\frac{۱}{۲^{۳\gamma}}$$

$$\Rightarrow ۲^{۵}=۲^{۳\gamma}\Rightarrow\gamma=\frac{۵}{۳}$$

گاز تک اتمی است.

(ب)

$$Q_{DA}=Q_{BC}=\circ \quad (\text{بی‌دررو})$$

$$Q_H=Q_{AB}=nC_p\Delta T=\frac{۵}{۲}nR\Delta T=\frac{۵}{۲}p\Delta V$$

$$=\frac{۵}{۲}(p_\circ)(۲V_\circ-V_\circ)=۲/۵\,p_\circ V_\circ$$

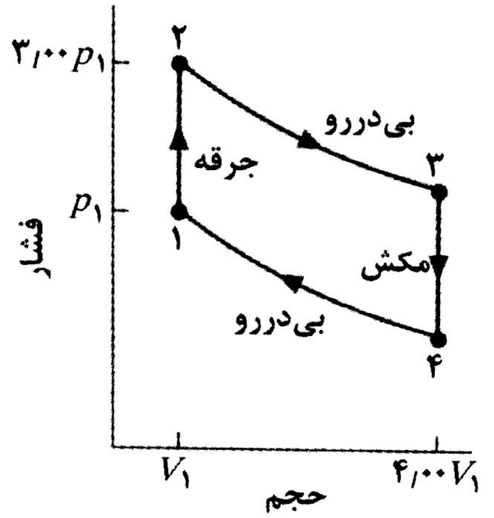
$$Q_L=Q_{CD}=nC_p\Delta T=\frac{۵}{۲}p\Delta V$$

$$Q_L=\frac{۵}{۲}\left(\frac{p_\circ}{۳۲}\right)(۸V_\circ-۱۶V_\circ)=-\circ/۶۲۵\,p_\circ V_\circ$$

$$\varepsilon=۱-\frac{|Q_L|}{Q_H}=۱-\frac{\circ/۶۲۵\,p_\circ V_\circ}{۲/۵\,p_\circ V_\circ}=\circ/۷۵ \quad \text{یا} \quad ٪۷۵$$

Scanned by CamScanner

۳۵●●●- چرخهٔ نشان داده شده در شکل ۱۶-۳۱ طرز کار یک ماشین درونسوز بنزینی را نشان می‌دهد. با حجم $V_۳ = ۴/۰۰V_۱$. فرض کنید که مخلوط بنزین- هوای مکیده شده، گازی آرمانی با $\gamma = ۱/۳۰$ است. نسبت‌های (الف) $T_۲/T_۱$ ، (ب) $T_۳/T_۱$، (پ) $T_۴/T_۱$ ، (ت) $p_۳/p_۱$ ، (ث) $p_۴/p_۱$ چقدر است؟ (ج) بازده ماشین چقدر است؟



شکل ۱۶-۳۱ مسئلهٔ ۳۵

حل: (الف) فرآیند ۲←۱ تک حجم است:

$$\frac{p_۱}{T_۱} = \frac{p_۲}{T_۲} \Rightarrow \frac{T_۲}{T_۱} = \frac{p_۲}{p_۱} = ۳/۰۰$$

(ب) فرآیند ۳←۲ بی‌دررو است:

$$\frac{T_۳}{T_۲} = \left(\frac{V_۲}{V_۳}\right)^{\gamma-۱} \Rightarrow \frac{T_۳}{۳T_۱} = \left(\frac{۱}{۴}\right)^{۰/۳} \Rightarrow \frac{T_۳}{۳T_۱} = ۰/۶۶$$

$$\Rightarrow \frac{T_۳}{T_۱} = ۱/۹۸$$

(پ) فرآیند ۴←۱ بی‌دررو است:

$$\frac{T_۴}{T_۱} = \left(\frac{V_۱}{V_۴}\right)^{\gamma-۱} \Rightarrow \frac{T_۴}{T_۱} = \left(\frac{۱}{۴}\right)^{۰/۳} = ۰/۶۶$$

Scanned by CamScanner

(ت)

$$\frac{p_۳}{p_۲}=\left(\frac{V_۲}{V_۳}\right)^{\gamma} \Rightarrow \frac{p_۳}{۳p_۱}=\left(\frac{۱}{۴}\right)^{۱/۳} \Rightarrow \frac{p_۳}{p_۱}=۰/۴۹۵$$

(ث)

$$\frac{p_۴}{p_۱}=\left(\frac{V_۱}{V_۴}\right)^{\gamma} \Rightarrow \frac{p_۴}{p_۱}=\left(\frac{۱}{۴}\right)^{۱/۳}=۰/۱۶۵$$

(ج)

$$\varepsilon=۱-\frac{|Q_C|}{Q_H}=۱-\frac{nC_V(T_۳-T_۴)}{nC_V(T_۲-T_۱)}$$

$$=۱-\frac{(۱/۹۸-۰/۶۶)T_۱}{(۳-۱)T_۱}=۰/۳۴ \text{ یا } ۳۴\%$$

Scanned by CamScanner

●●۴۲۰۰- توان موتـور یـک یخچـال ۲۰۰W اسـت. اگـر دمـای قسمت سردکن ۲۷۰K و دمای هوای بیرون ۳۰۰K باشد و بـا فرض اینکه بازده یک یخچال کارنو برای آن در نظر گرفته شود بیشینهٔ مقدار انرژی کـه بـه صـورت گرمـا مـی‌تـوان در مـدت ۱۰/۰min از قسمت سردکن گرفت چقدر است؟

حل:

$$W = Pt = (۲۰۰)(۱۰\times۶۰) = ۱۲\times۱۰^{۴}\ \text{J}$$

$$\frac{|Q_L|}{|Q_H|} = \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow \frac{|Q_L|}{|Q_L|+W} = \frac{T_L}{T_H}$$

$$\frac{|Q_L|}{|Q_L|+۱۲\times۱۰^{۴}} = \frac{۲۷۰}{۳۰۰} \Rightarrow |Q_L| = ۱/۰۸\times۱۰^{۶}\ \text{J}$$

Scanned by CamScanner

●●۴۴۰۰- (الف) در طی هر چرخه، یک ماشین کارنو ۷۵۰J انرژی را به صورت گرما از منبع دمای بالا در ۳۶۰K و منبع دمای پایین واقع در ۲۸۰K جذب می‌کند. در هر چرخه چقدر کار انجام می‌شود؟ (ب) سپس این ماشین به صورتی درآورده می‌شود که به طور معکوس با عملکرد یک یخچال کارنو میان همان دو منبع کار کند. در طی هر چرخه برای گرفتن ۱۲۰۰ J انرژی به صورت گرما از منبع دمای پایین چقدر کار مورد نیاز است؟

حل: (الف)

$$\frac{|Q_L|}{|Q_H|}=\frac{T_L}{T_H}\Rightarrow\frac{|Q_L|}{۷۵۰}=\frac{۲۸۰}{۳۶۰}\Rightarrow|Q_L|=۵۸۳/۳\,\text{J}$$

$$W=|Q_H|-|Q_L|=۷۵۰-۵۸۳/۳=۱۶۶/۷\,\text{J}$$

(ب)

$$\frac{|Q_L|}{|Q_H|}=\frac{T_L}{T_H}\Rightarrow\frac{|Q_L|}{|Q_L|-W}=\frac{T_L}{T_H}$$

$$\frac{۱۲۰۰}{۱۲۰۰+W}=\frac{۲۸۰}{۳۶۰}\Rightarrow W=۳۴۳\,\text{J}$$

Scanned by CamScanner

۴۹- یک میلهٔ مسی استوانه‌ای شکل به طول $۱/۵۰\text{m}$ و شعاع $۲/۰۰\text{cm}$ عایق‌بندی شده است تا از اتلاف گرما از سطح استوانه‌ای شکل جلوگیری شود. یک انتهای میله به منبع گرمایی در $۳۰۰/۰°\text{C}$ و انتهای دیگر آن به منبع گرمایی در $۳۰/۰°\text{C}$ متصل شده است. آهنگ افزایش انتروپی دستگاه میله- منبع‌ها چقدر است؟

حل:

$$P_{\text{رسانش}} = kA\frac{|\Delta T|}{L}$$ ؛ گرمای عبوری از میله

$$= (۴۰۱)(۳/۱۴)(۲\times ۱۰^{-۲})^{۲}\,\frac{(۳۰۰-۳۰)}{۱/۵}$$

$$= ۹۰/۶۶\ \text{J/s}$$

Scanned by CamScanner

$$\Delta S_H = \frac{Q}{T} \Rightarrow \frac{\Delta S_H}{t} = \frac{H}{t} = \frac{-۹۰/۶۶}{۲۷۳+۳۰} = -۰/۱۵۸\ \text{(J/K)/s}$$

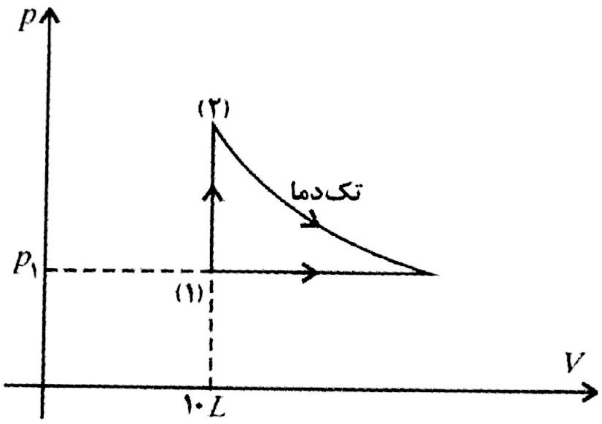
$$\Delta S_L = \frac{Q}{T} \Rightarrow \frac{\Delta S_L}{t} = \frac{H}{t} = \frac{۹۰/۶۶}{۲۷۳+۳۰} = ۰/۲۹۹\ \text{(J/K)/s}$$

$$\frac{\Delta S_{tot}}{t} = ۰/۲۹۹ - ۰/۱۵۸ = ۰/۱۴۱\ \text{(J/K)/s}$$

Scanned by CamScanner

۵۲- فرض کنید $1/0\,mol$ از یک گاز آرمانی تک اتمی که در آغاز $10L$ و در دمای $300K$ قرار دارد در حجم ثابت تا $600K$ گرم می‌شود، سپس می‌گذاریم تا به طور تک‌دما تا رسیدن به فشار اولیهٔ خود منبسط شود و سرانجام در فشار ثابت تا حجم، فشار و دمای اولیه متراکم می‌شود. در طی این چرخه، (الف) انرژی خالص وارد شده به دستگاه (گاز) به صورت گرما و (ب) کار خالص انجام شده به وسیلهٔ گاز چقدر است؟ (پ) بازده چرخه چقدر است؟

حل:



(الف) فرآیند ۲ ← ۱ تک حجم است؛

$$W_{12} = 0$$

$$Q_{12} = nC_V(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}(1)(8/31)(600 - 300)$$

$$Q_{12} = 3740\,J$$

$$V_2 = V_1 = 10\,L$$

$$T_3 = T_2 = 600\,K$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_3}{T_3} \Rightarrow V_3 = \frac{V_1 T_3}{T_1} = \frac{10(600)}{300} = 20\,L$$

فرآیند ۳ ← ۲ تک‌دماست؛

$$\Delta E_{int} = 0 \Rightarrow Q_{23} = W_{23} = nRT_2 \ln\frac{V_3}{V_2} = 1(8/31)(600)\ln\left(\frac{20}{10}\right)$$

$$= 3456\,J$$

Scanned by CamScanner

فرآیند ۱→ ۳ تک‌فشار است؛

$$Q_{۳۱} = nC_p(T_۱ - T_۳) = ۱\left(\frac{۵}{۲}\right)(۸/۳۱)(۳۰۰ - ۶۰۰) = -۶۲۳۳\ \text{J}$$

$$Q_{\text{tot}} = ۳۷۴۰ + ۳۴۵۶ - ۶۳۳۳ = ۹۶۳\ \text{J}$$

ب) $\Delta E_{\text{int}} = ۰ \Rightarrow W = Q = ۹۶۳\ \text{J}$

پ) Q_H ، انرژی گرمایی مثبت است.

$$Q_H = ۳۷۴۰ + ۳۴۵۶ = ۷۱۹۶\ \text{J}$$

$$\varepsilon = \frac{W}{|Q_H|} = \frac{۹۶۳}{۷۱۹۶} = ۰/۱۳۴ \text{ یا } ۱۳/۴٪$$

Scanned by CamScanner

۵۳- فرض کنید که در پوستهٔ زمین و در نزدیکی یکی از قطب‌ها که در آن دمای سطح زمین $-۴۰^\circ C$ است یک چاه تا عمقی حفر شود که در آنجا دما $۸۰۰^\circ C$ است. (الف) حد نظری بازده ماشینی که میان این دو دما عمل می‌کند چقدر است؟ (ب) اگر همه انرژی گرمایی داده شده به منبع با دمای پایین برای ذوب یخی که در آغاز در دمای $-۴۰^\circ C$ بوده است به کار رود، با چه آهنگی آب $۰^\circ C$ یک نیروگاه با توان $۱۰۰ MW$ (که یک ماشین در نظر گرفته می‌شود) تولید می‌شود؟ گرمای ویژهٔ یخ $۲۲۲۰\ J/kg\cdot K$ و گرمای ذوب یخ $۳۳۳\ KJ/kg$ است. (توجه کنید که در این حالت ماشین می‌تواند فقط میان $۰^\circ C$ و $۸۰۰^\circ C$ کار کند. انرژی خروجی در دمای $-۴۰^\circ C$ نمی‌تواند چیزی را بالاتر از $-۴۰^\circ C$ گرم کند).

حل: (الف)

$$T_C = -۴۰ + ۲۷۳ = ۲۳۳\,K$$

و

$$T_H = ۸۰۰ + ۲۷۳ = ۱۰۷۳\,K$$

$$\varepsilon = ۱ - \frac{T_C}{T_H} = ۱ - \frac{۲۳۳}{۱۰۷۳} = ۰/۷۸ \text{ یا } ٪۷۸$$

(ب)

$$Q_C = mc\Delta T + mL_F$$

$$\frac{dQ_C}{dt} = (c\Delta T + L_F)\frac{dm}{dt} \qquad \text{(I)}$$

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{۲۷۳}{۱۰۷۳} = ۰/۲۵۴$$

$$\frac{Q_C}{Q_C + W} = ۰/۲۵۴ \Rightarrow Q_C = ۰/۲۵۴\,Q_C + ۰/۲۵۴\,W$$

$$\Rightarrow Q_C = ۰/۳۵\ ,\ W = ۰/۳۵\,Pt$$

$$\frac{dQ_C}{dt} = ۰/۳۴۲P = (۰/۳۴۲)(۱۰۰\times۱۰^۶) = ۳/۴۲\times۱۰^۷ \qquad \text{(II)}$$

با جایگذاری رابطهٔ (II) در (I) داریم:

$$۳/۴۲\times۱۰^۷ = [(۲۲۲۰)(۴۰) + (۳/۳۳\times۱۰^۵)]\frac{dm}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{dm}{dt} = ۸۲\,kg/s$$

Scanned by CamScanner

۵۵- یک تکه مس به جرم $۶۰۰\,g$ و دمای $۸۰/۰°C$ در $۷۰/۰g$ آب $۱۰/۰°C$ داخل یک محفظهٔ عایق‌بندی شده قرار داده می‌شود. (در مورد گرمای ویژه به جدول ۱۸-۳ نگاه کنید.) (الف) دمای تعادل دستگاه مس- آب چقدر است؟ تغییر انتروپی (ب) مس (پ) آب و (ت) سامانهٔ مس- آب موقع رسیدن به دمای تعادل چقدر است؟

حل: (الف)

$$m_{cu}c_{cu}(۸۰-T_e)=m_w c_w(T_e-۱۰)$$

$$(۶۰۰)(۰/۰۹۲۳)(۸۰-T_e)=(۷۰)(۱)(T_e-۱۰)\Rightarrow T_e\approx ۴۱°C$$

(ب)

$$\Delta S_{cu}=m_{cu}c_{cu}\ln\frac{T_f}{T_i}=(۰/۶)(۳۸۶)\ln\frac{۳۱۴}{۳۵۳}$$

$$=-۲۷/۱\ J/K$$

(پ)

$$\Delta S_w=m_w c_w\ln\frac{T_f}{T_i}=(۰/۷)(۴۱۸۷)\ln\frac{۳۱۴}{۲۸۳}$$

$$=۳۰/۳\ J/K$$

(ت)

$$\Delta S_{total}=\Delta S_{cu}+\Delta S_w=-۲۷/۱+۳۰/۳=۳/۲\ J/K$$

Scanned by CamScanner

۷۰- قطعه‌ای تنگستن به جرم ۴۵/۰g در دمای ۳۰/۰°C و قطعه‌ای نقره به جرم ۲۵/۰g در دمای ۱۲۰°C- با هم در یک محفظهٔ عایق‌بندی شده قرار داده می‌شوند. (در مورد گرماهای ویژه به جدول ۱۴-۳ نگاه کنید.) (الف) دمای تعادل چقدر است؟ تغییر انتروپی (ب) تنگستن، (پ) نقره، و (ت) سامانهٔ تنگستن- نقره هنگام رسیدن به دمای تعادل چقدر است؟

حل: در این فرآیند هیچ تغییر فازی دیده نمی‌شود، اندیس ۱ را برای تنگستن و اندیس ۲ را برای نقره انتخاب می‌کنیم،

$$Q_۱ + Q_۲ = ۰$$

$$m_۱ c_۱ (T_e - T_۱) + m_۲ c_۲ (T_e - T_۲) = ۰$$

$$(۰/۰۴۵)(۱۳۴)(T_e - ۳۰) + (۰/۰۲۵)(۲۳۶)(T_e + ۱۲۰) = ۰$$

$$۶/۰۳ T_e - ۱۸۰/۹ + ۵/۹ T_e + ۷۰۸ = ۰ \Rightarrow T_e = -۴۴/۱۸°\text{C}$$

(ب) $$\Delta S_۱ = m_۱ c_۱ \ln \frac{T_e}{T_۱} = (۰/۰۴۵)(۱۳۴) \ln\left(\frac{۲۷۳ - ۴۴/۱۸}{۲۷۳ + ۳۰}\right)$$

$$\Delta S_۱ = -۱/۶۹۳ \text{ J/K}$$

(پ) $$\Delta S_۲ = m_۲ c_۲ \ln \frac{T_e}{T_۲} = (۰/۰۲۵)(۲۳۶) \ln\left(\frac{۲۷۳ - ۴۴/۱۸}{۲۷۳ - ۱۲۰}\right)$$

$$\Delta S_۲ = ۲/۳۷ \text{ J/K}$$

(ت) $$\Delta S = \Delta S_۱ + \Delta S_۲ = -۱/۶۹۳ + ۲/۳۷ = ۰/۶۷۷ \text{ J/K}$$

Scanned by CamScanner

۷۴- بازده یک ماشین کارنو با دمای منبع بـالای $۴۰۰K$ برابـر با ۳۰/۰٪ است. دمای منبع دمای پایین چقدر باید تغییر کند تـا بازده ماشین به ۴۰/۰٪ برسد؟

حل:

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{T_C}{T_H} \Rightarrow ۰/۳ = ۱ - \frac{T_C}{۴۰۰} \Rightarrow T_C = ۲۸۰K$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{T_C + \Delta T}{T_H} \Rightarrow ۰/۴ = ۱ - \frac{T_C + \Delta T}{۴۰۰} \Rightarrow T_C + \Delta T = ۲۴۰$$

$$\Rightarrow ۲۸۰ + \Delta T = ۲۴۰ \Rightarrow \Delta T = -۴۰K$$

Scanned by CamScanner

۷۵- SSM سامانه A با سه ذره و دستگاه B با پنج ذره در جعبهٔ عایق‌بندی شده‌ای مشابه با جعبهٔ شکل ۱۶-۱۷ قرار دارند. کم‌ترین چندتایگی W (الف) دستگاه A و (ب) دستگاه B چقدر است؟ بیش‌ترین کثرت W (پ) A و (ت) B چقدر است؟ بیش‌ترین انتروپی (ث) A و (ج) B چقدر است؟

حل: کم‌ترین کثرت W، زمانی است که تمامی ذرات تنها در نیمی از جعبه قرار دارند و نیمه دیگر جعبه خالی است.

$$W_{\min} = \frac{N!}{n_۱!n_۲!}$$

(الف) $$W_{\min A} = \frac{(۳)!}{(۳)!(۰)!} = ۱$$

(ب) $$W_{\min B} = \frac{(۵)!}{(۵)!(۰)!} = ۱$$

(پ) بیشترین کثرت W، زمانی است که تمامی ذرات در هر دو نیمه جعبه به‌صورت مساوی تقسیم شوند.

$$n_۱ = ۳\ ,\ n_۲ = ۱$$

$$W_{\max A} = \frac{(۳)!}{(۲)!(۱)!} = ۳$$

(ت) $$n_۱ = ۳\ ,\ n_۲ = ۲$$

$$W_{\max B} = \frac{(۵)!}{(۲)!(۳)!} = ۱۰$$

(ث) $$S = k \ln W_{\max A} = (۱/۳۸ \times ۱۰^{-۲۳}) \ln ۳ = ۱/۵۲ \times ۱۰^{-۲۳}\ \text{J/K}$$

(ج) $$S = k \ln W_{\max B} = (۱/۳۸ \times ۱۰^{-۲۳}) \ln ۱۰ = ۳/۲ \times ۱۰^{-۲۳}\ \text{J/K}$$

Scanned by CamScanner

۷۷- رابطه بین بازده ماشین گرمایی آرمانی برگشت‌پذیر و ضریب کارآیی یخچال برگشت‌پذیر به‌دست آمده به وسیلهٔ کار معکوس ماشین را پیدا کنید.

حل: بازده ماشین گرمایی آرمانی برگشت‌پذیر و ضریب کارآیی یخچال برگشت‌پذیر برابرند با

$$\varepsilon = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad \text{و} \quad K = \frac{|Q_H| - |W|}{|W|}$$

بنابراین

$$K = \frac{|Q_H| - |W|}{|W|} = \frac{|Q_H|}{|W|} - ۱ = \frac{۱}{\varepsilon} - ۱$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{۱}{K + ۱}$$

Scanned by CamScanner